

Tesis (TM092501)

OPTIMASI KEKASARAN PERMUKAAN, TEBAL LAPISAN *RECAST*,
LEBAR PEMOTONGAN DAN LAJU Pengerjaan Bahan
pada *WIRE-EDM* Menggunakan Metode Taguchi dan
Logika *Fuzzy*

BACHTIAR

• 2109201005

DOSEN PEMBIMBING

• Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc, PhD.

PENDAHULUAN



Kualitas pada industri manufaktur selain menekankan pada produk yang dihasilkan, juga perlu memperhatikan **kualitas pada proses produksi** (Garvin, 1996).

PENDAHULUAN

KUALITAS PROSES

PENINGKATAN
EFEKTIFITAS DAN
EFISIENSI PROSES

MENGOPTIMALKAN
PARAMETER
PROSES



Parameter Proses

On time

Open voltage

Off time

Servo voltage

Wire feed

Water flow

Proses

Wire-EDM

Respon

tebal lapisan
recast

lebar pemotongan

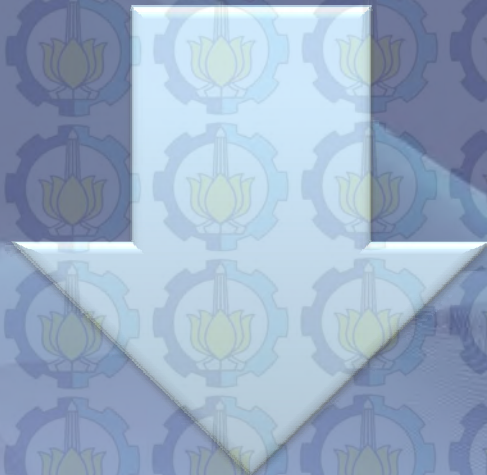
kekasaran
permukaan

laju pengerjaan
bahan

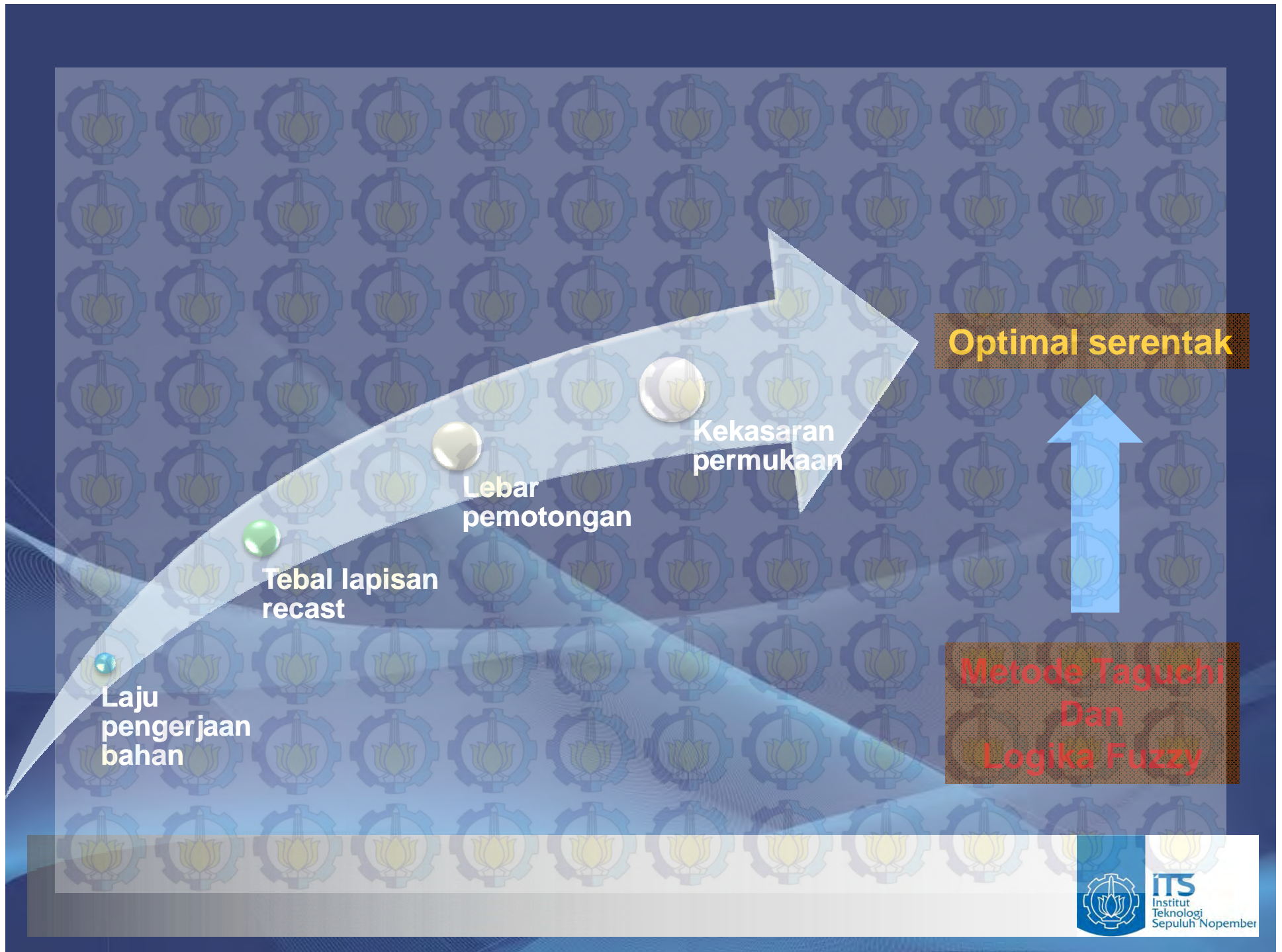




Laju pengerjaan bahan



Tebal lapisan *recast*
Lebar pemotongan
Kekasaran permukaan



Vaani dan Hameedullah (2005)

- *Hardened Tool Steel* (SKD-11) menggunakan elektroda kawat dari tembaga.
- Pareto Anova dengan *noise* yang berupa temperatur dielektrik, konsentrasi partikel pada cairan elektrolit dan fluktuasi tegangan dari kawat elektroda.
- Hasilnya menyatakan bahwa seting parameter yang berupa arus, *on-time*, tekanan *flushing*, dan *voltase* akan mempengaruhi *material removal rate* dan kekasaran dari benda kerja.

Fong dan Chen (2006)

- *Hardened Tool Steel* (SKD-11) dengan elektroda tembaga.
- Menggunakan metode Taguchi dan logika *fuzzy* untuk mengoptimalkan respon kepresisian dan akurasi secara serentak.
- Hasil eksperimen menunjukkan bahwa faktor *pulse time*, *duty factor*, dan *peak current* memberikan pengaruh sebesar 81,5% terhadap variasi respon.

Himawan (2008)

- *Hardened Tool Steel* (SLD) menggunakan elektroda kawat dari tembaga.
- Menggunakan metode permukaan respon dengan rancangan percobaan *central composite design* untuk mengoptimalkan lebar pemotongan, kekasaran permukaan, dan waktu pengerjaan material.
- Parameter proses yang digunakan *on time*, *off time*, *servo reference voltage*, dan *servo speed*.
- Hasil eksperimen menunjukkan bahwa seluruh faktor memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon yang diamati.

Qibtiyah (2008)

- Baja HSS dengan elektroda kawat dari kuningan.
- menggunakan metode permukaan respon dengan rancangan percobaan *Box Behnken* untuk mengoptimalkan tebal lapisan *recast* dan waktu pengerjaan material.
- Hasil eksperimen menunjukkan bahwa *on time*, *off time*, *main power supply current*, *main power supply voltage* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon yang diamati.

Puri (2004)

- Baja HCHC menggunakan elektroda kawat dari kuningan.
- Untuk mengoptimalkan kekasaran permukaan dan laju pengerjaan material menggunakan rancangan percobaan *ortogonal array* dan optimasi *multi respon* menggunakan logika *fuzzy*.
- Hasil eksperimen menunjukkan bahwa faktor *gap voltage* dan *gap current* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon yang diamati. Hasil penelitian juga menunjukkan kenaikan S/N rasio pada hasil eksperimen konfirmasi.

Gupta et al. (2010)

- Baja AISI P20HSS dengan proses *high speed CNC turning*.
- Metode Taguchi dan logika *fuzzy*. Logika *fuzzy* digunakan untuk mengoptimalkan respon *surface roughness*, *tool life*, *cutting force*, dan *power consumption* secara serentak.
- Hasil eksperimen menunjukkan bahwa *depth of cut* dan cairan pendingin mempunyai pengaruh yang cukup signifikan terhadap respon.

Rumusan Masalah

- Apakah faktor-faktor seperti: *on time*, *open voltage*, *off time*, *servo voltage*, *wire feed*, dan *water flow* memiliki kontribusi dalam mengurangi variasi dari respon tebal lapisan *recast*, lebar pemotongan, kekasaran permukaan, dan laju pengerjaan bahan secara serentak.
- Bagaimana seting yang tepat dari faktor-faktor tersebut pada proses pemesinan *wire-EDM* sehingga dapat meminimumkan nilai tebal lapisan *recast*, lebar pemotongan, kekasaran permukaan dan memaksimalkan *material removal rate*.





Batasan Masalah

- Tidak membahas perubahan struktur mikro lapisan *recast* yang timbul pada permukaan benda kerja.
- Tidak membahas tentang komponen biaya pada proses pemesinan.
- Tidak membahas sistem elektronika, sistem kontrol, dan pemrograman CNC yang digunakan pada proses pemesinan.



Asumsi

Faktor-faktor yang tidak diteliti dianggap selalu konstan dan tidak berpengaruh secara signifikan terhadap hasil penelitian.

Material yang digunakan memiliki kehomogenan sifat mekanik dan komposisi kimia.

Mesin bekerja dalam kondisi baik.

Alat ukur yang digunakan dalam keadaan layak dan terkalibrasi.



Tujuan Penelitian

- Mengetahui besar kontribusi dari faktor-faktor seperti: *on time*, *open voltage*, *off time*, *servo voltage*, *wire feed*, dan *water flow* dalam mengurangi variasi dari respon tebal lapisan *recast*, lebar pemotongan, kekasaran permukaan dan laju pengerjaan bahan secara serentak.
- Menentukan kombinasi optimum dari faktor-faktor tersebut pada *wire*-EDM sehingga dapat meminimumkan nilai tebal lapisan *recast*, lebar pemotongan, kekasaran permukaan dan memaksimalkan laju pengerjaan bahan.



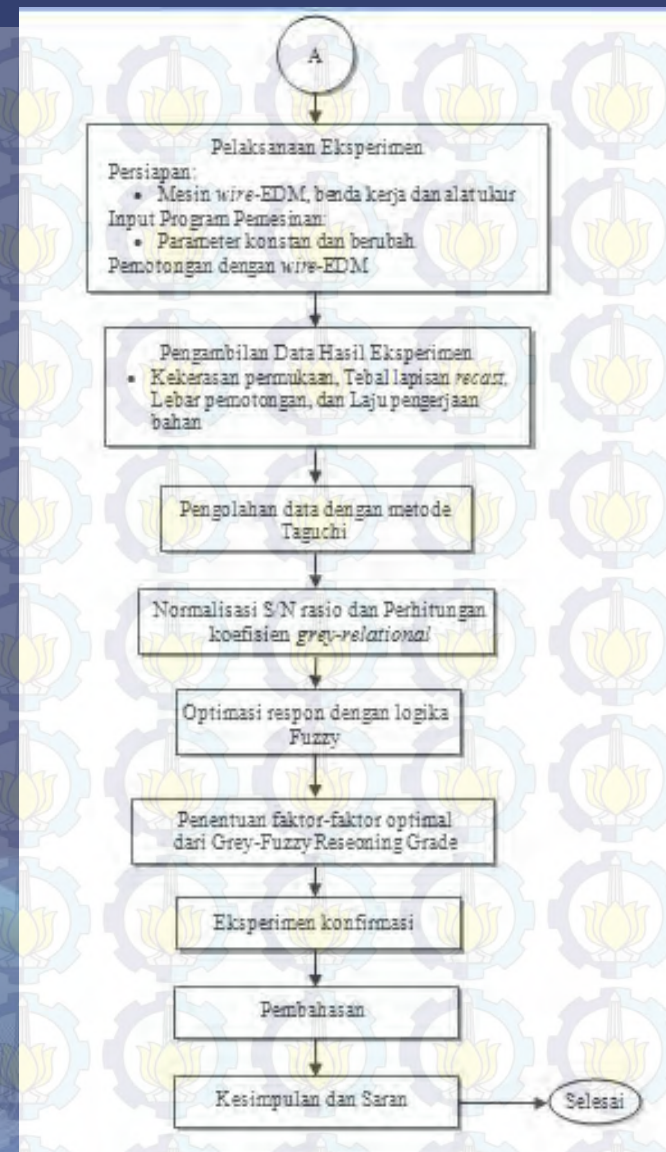
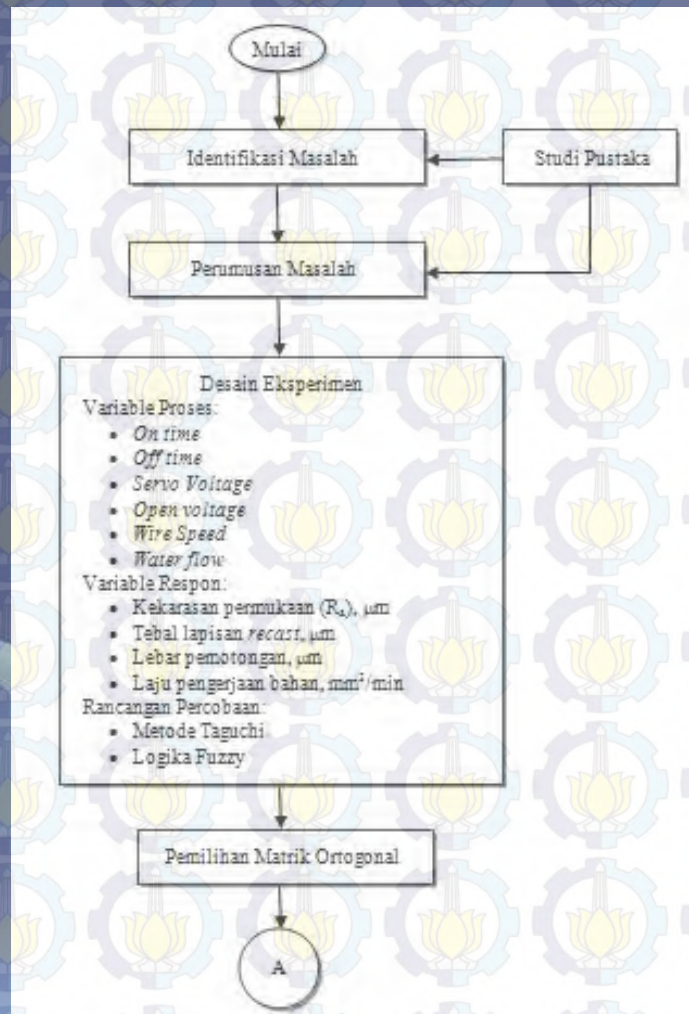
MANFAAT PENELITIAN

Memberikan alternatif lain pada penelitian-penelitian yang telah ada yang mengangkat masalah tentang optimasi laju pengerjaan bahan, tebal lapisan *recast*, lebar pemotongan, dan kekasaran permukaan pada pembuatan benda kerja.

Menambah *database* tentang pengaturan seting faktor pada proses pemesinan *wire*-EDM untuk mengoptimasikan laju pengerjaan bahan, tebal lapisan *recast*, lebar pemotongan, dan kekasaran permukaan pada pembuatan benda kerja.



Diagram Alir Penelitian



TAHAPAN PENELITIAN

Eksperimen

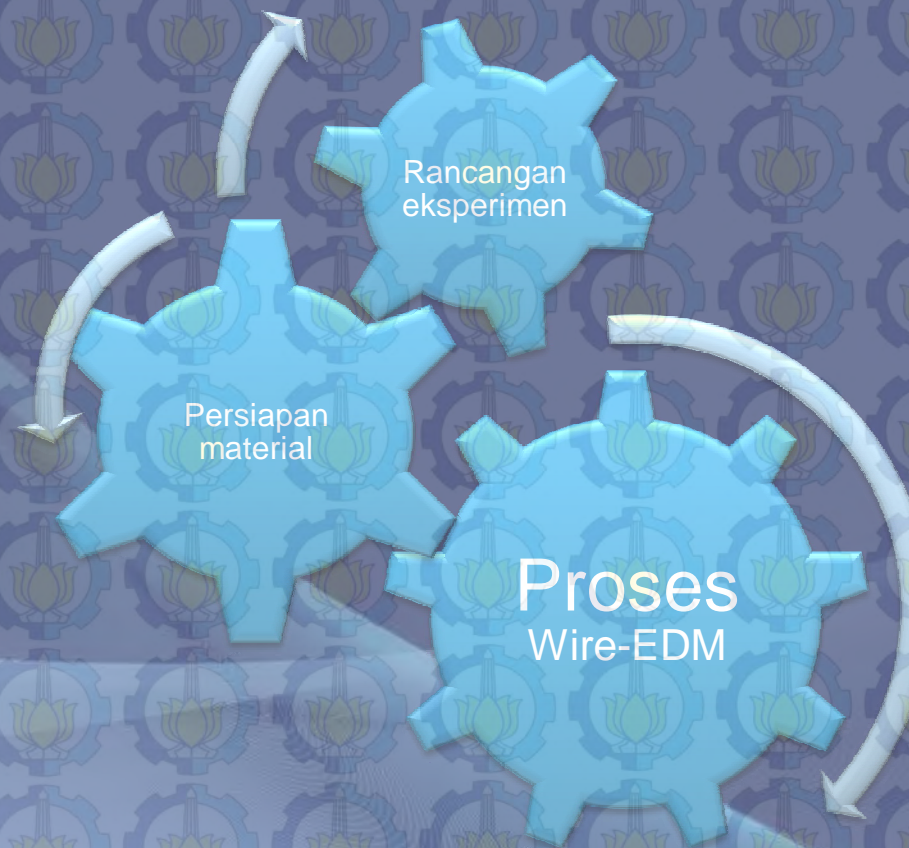
Pengambilan Data

Analisa

Kesimpulan



Tahap Eksperimen

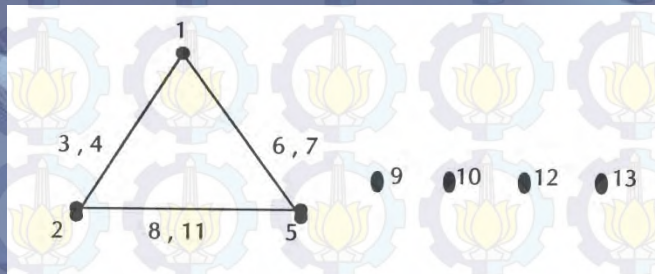


Rancangan Eksperimen

Matriks Ortogonal
 $L_{27}(3^6)$



Grafik Linier



Tabel Rancangan Percobaan

| Eks. | Faktor | | | | | | | | | | | |
|------|--------|---|--------|--------|---|--------|--------|--------|---|---|--------|---|
| | A | B | AXB(1) | AXB(2) | C | AXC(1) | AXC(2) | BXC(1) | D | E | BXC(2) | F |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 4 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| 5 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 |
| 6 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 7 | 1 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 |
| 8 | 1 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 |
| 9 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| 10 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| 11 | 2 | 1 | 2 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 12 | 2 | 1 | 2 | 3 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 |
| 13 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 3 | 2 | 3 | 1 | 3 | 1 |
| 14 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 3 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 15 | 2 | 2 | 3 | 1 | 3 | 1 | 2 | 1 | 2 | 3 | 2 | 3 |
| 16 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 | 2 | 3 | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 |
| 17 | 2 | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 | 1 |
| 18 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 |
| 19 | 3 | 1 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 3 |
| 20 | 3 | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 |
| 21 | 3 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 |
| 22 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 3 | 3 | 2 |
| 23 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 | 3 |
| 24 | 3 | 2 | 1 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 |
| 25 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| 26 | 3 | 3 | 2 | 1 | 2 | 1 | 3 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 |
| 27 | 3 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 2 | 1 | 3 | 1 | 3 |

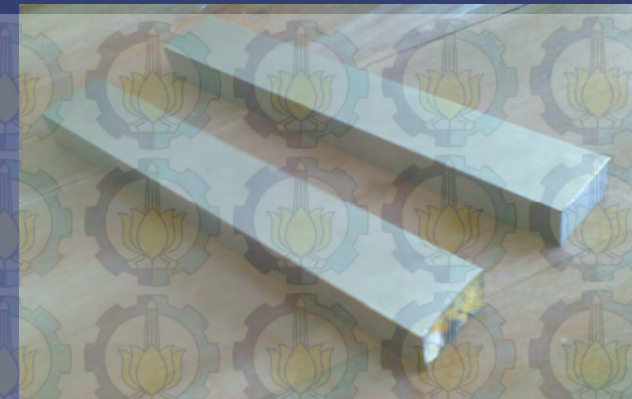
Persiapan Material



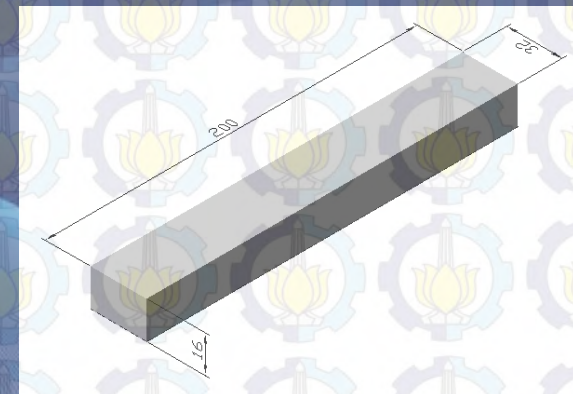
Raw Material

Material yang digunakan adalah baja perkakas SKD-11 dengan kekerasan 60 HRC, dimensi $\varnothing 38 \times 200$ mm.

Machining



Material Uji



Proses Wire-EDM

Tabel seting faktor eksperimen

| Eks. | Faktor | | | | | |
|------|--------|----|-----|----|----|----|
| | ON | OV | OFF | SV | WF | WL |
| 1 | 4 | 2 | 10 | 30 | 8 | 5 |
| 2 | 4 | 2 | 11 | 35 | 9 | 10 |
| 3 | 4 | 2 | 12 | 40 | 10 | 15 |
| 4 | 4 | 3 | 10 | 35 | 9 | 15 |
| 5 | 4 | 3 | 11 | 40 | 10 | 5 |
| 6 | 4 | 3 | 12 | 30 | 8 | 10 |
| 7 | 4 | 4 | 10 | 40 | 10 | 10 |
| 8 | 4 | 4 | 11 | 30 | 8 | 15 |
| 9 | 4 | 4 | 12 | 35 | 9 | 5 |
| 10 | 6 | 2 | 10 | 35 | 10 | 10 |
| 11 | 6 | 2 | 11 | 40 | 8 | 15 |
| 12 | 6 | 2 | 12 | 30 | 9 | 5 |
| 13 | 6 | 3 | 10 | 40 | 8 | 5 |
| 14 | 6 | 3 | 11 | 30 | 9 | 10 |
| 15 | 6 | 3 | 12 | 35 | 10 | 15 |
| 16 | 6 | 4 | 10 | 30 | 9 | 15 |
| 17 | 6 | 4 | 11 | 35 | 10 | 5 |
| 18 | 6 | 4 | 12 | 40 | 8 | 10 |
| 19 | 8 | 2 | 10 | 40 | 9 | 15 |
| 20 | 8 | 2 | 11 | 30 | 10 | 5 |
| 21 | 8 | 2 | 12 | 35 | 8 | 10 |
| 22 | 8 | 3 | 10 | 30 | 10 | 10 |
| 23 | 8 | 3 | 11 | 35 | 8 | 15 |
| 24 | 8 | 3 | 12 | 40 | 9 | 5 |
| 25 | 8 | 4 | 10 | 35 | 8 | 5 |
| 26 | 8 | 4 | 11 | 40 | 9 | 10 |
| 27 | 8 | 4 | 12 | 30 | 10 | 15 |

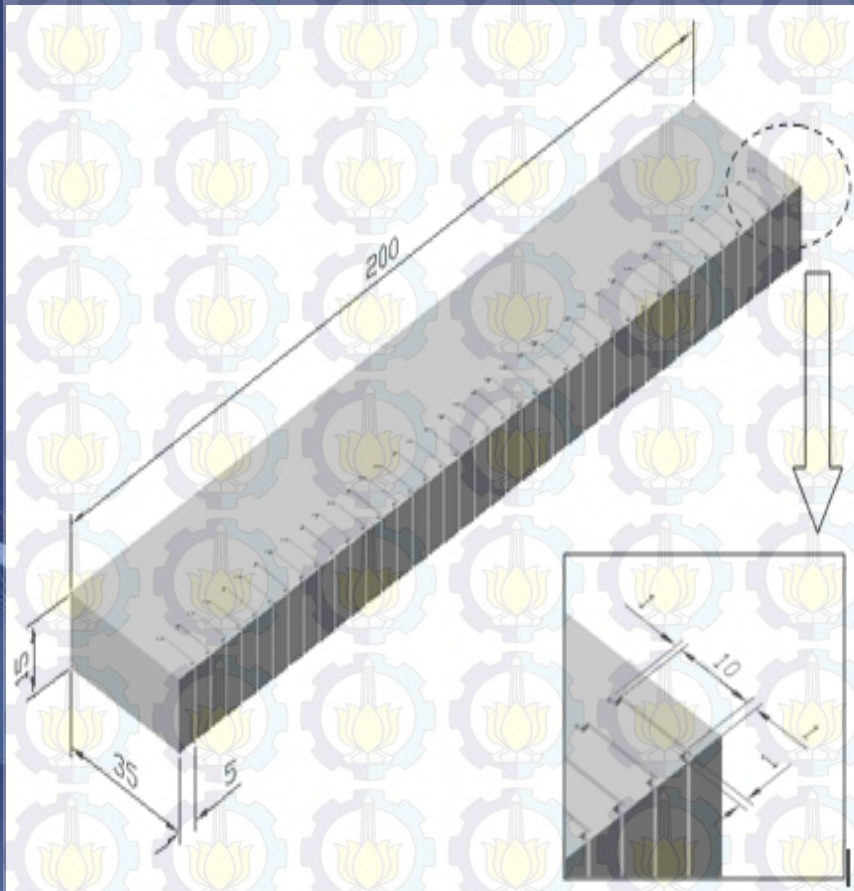
Tabel seting faktor dan level

| Faktor/parameter proses | | | level 1 | level 2 | level 3 |
|-------------------------|---------------|--------------------|---------|---------|----------|
| A | On time | μ s | 0,4 (4) | 0,6 (6) | 0,8 (8) |
| B | Open voltage | volt | 75 (2) | 80 (3) | 85 (4) |
| C | Off time | μ s | 10 (10) | 11 (11) | 12 (12) |
| D | Servo voltage | volt | 30 (30) | 35 (35) | 40 (40) |
| E | Wire feed | mm/s | 170 (8) | 200 (9) | 220 (10) |
| F | Water flow | kg/cm ² | 8 (5) | 10 (10) | 12 (15) |



Mesin wire-EDM yang digunakan pada penelitian ini adalah CHMER CW32F.

Tahap Pengambilan Data



1. Waktu Pemotongan

2. Lebar Pemotongan

3. Laju pengerjaan bahan

4. Kekasaran Permukaan

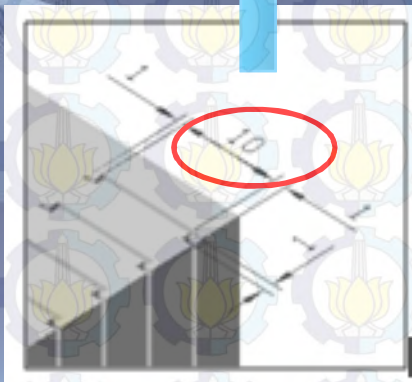
5. Tebal lapisan *Recast*



Laju Pengerjaan Bahan



Stopwatch
ketelitian 1/100 detik



$$MRR = V_c \times b \times h \text{ (mm}^3/\text{min)}$$

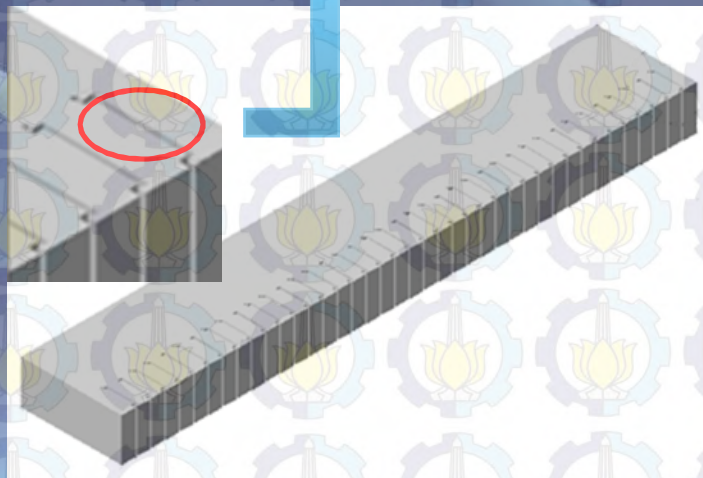
Tabel Laju Pengerjaan Bahan

| Replikasi 1 | Replikasi 2 | Replikasi 3 |
|-------------|-------------|-------------|
| 17.41 | 17.14 | 17.25 |
| 14.59 | 14.22 | 14.31 |
| 12.90 | 12.92 | 12.79 |
| 16.14 | 16.07 | 15.93 |
| 15.10 | 15.22 | 14.94 |
| 17.82 | 17.38 | 17.62 |
| 16.19 | 16.22 | 16.91 |
| 16.65 | 16.92 | 17.13 |
| 15.52 | 15.17 | 15.01 |
| 21.43 | 21.04 | 21.78 |
| 19.95 | 19.84 | 19.73 |
| 21.41 | 21.20 | 21.67 |
| 21.75 | 21.56 | 21.59 |
| 23.84 | 24.08 | 24.00 |
| 21.21 | 21.03 | 21.42 |
| 22.27 | 21.77 | 22.28 |
| 22.07 | 22.00 | 22.13 |
| 21.19 | 20.54 | 20.78 |
| 28.35 | 27.89 | 28.33 |
| 28.97 | 28.98 | 28.72 |
| 29.17 | 28.66 | 29.32 |
| 21.84 | 21.79 | 21.80 |
| 26.27 | 26.59 | 26.69 |
| 25.09 | 24.85 | 25.23 |
| 27.95 | 28.64 | 28.30 |
| 27.08 | 28.01 | 27.71 |
| 27.51 | 27.17 | 27.55 |

Lebar Pemotongan



Nikon measurescope



Tabel Lebar Pemotongan (mm)

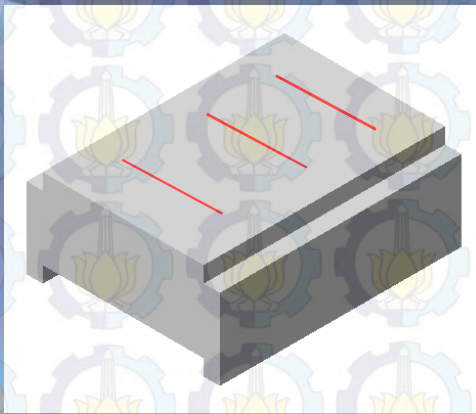
| Replikasi 1 | Replikasi 2 | Replikasi 3 |
|-------------|-------------|-------------|
| 350.00 | 343.33 | 346.67 |
| 336.67 | 326.67 | 330.00 |
| 330.00 | 330.00 | 326.67 |
| 340.00 | 336.67 | 333.33 |
| 343.33 | 346.67 | 340.00 |
| 343.33 | 333.33 | 340.00 |
| 336.67 | 336.67 | 350.00 |
| 340.00 | 346.67 | 350.00 |
| 350.00 | 343.33 | 340.00 |
| 353.33 | 350.00 | 360.00 |
| 360.00 | 356.67 | 353.33 |
| 350.00 | 346.67 | 353.33 |
| 350.00 | 346.67 | 346.67 |
| 350.00 | 356.67 | 350.00 |
| 360.00 | 356.67 | 363.33 |
| 350.00 | 343.33 | 350.00 |
| 356.67 | 356.67 | 360.00 |
| 360.00 | 350.00 | 353.33 |
| 370.00 | 366.67 | 366.67 |
| 370.00 | 370.00 | 366.67 |
| 370.00 | 363.33 | 370.00 |
| 360.00 | 360.00 | 360.00 |
| 350.00 | 353.33 | 353.33 |
| 360.00 | 356.67 | 363.33 |
| 360.00 | 360.00 | 360.00 |
| 350.00 | 366.67 | 356.67 |
| 360.00 | 353.33 | 360.00 |

Kekasaran Permukaan



Panjang pengukuran 0.8 mm
dan X5

Mitutoyo *surf*test 401



Posisi pengukuran

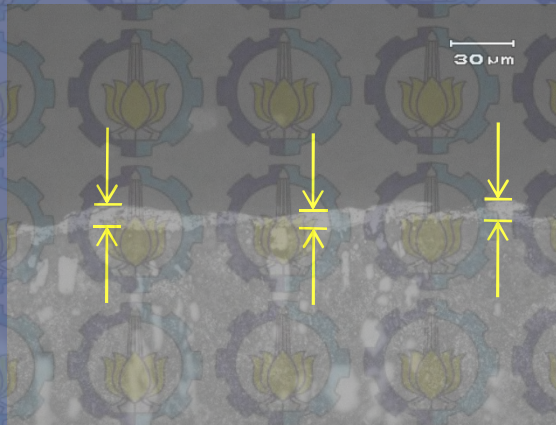
Tabel Kekasaran Permukaan (R_a)

| Replikasi 1 | Replikasi 2 | Replikasi 3 |
|-------------|-------------|-------------|
| 1.58 | 1.63 | 1.62 |
| 1.63 | 2.02 | 1.72 |
| 2.02 | 2.19 | 1.95 |
| 2.00 | 2.16 | 2.30 |
| 2.11 | 2.20 | 2.15 |
| 2.18 | 2.27 | 2.27 |
| 2.12 | 1.86 | 1.96 |
| 2.11 | 1.82 | 1.95 |
| 2.25 | 2.34 | 2.15 |
| 2.66 | 2.07 | 2.44 |
| 1.98 | 2.21 | 2.15 |
| 2.32 | 2.18 | 2.20 |
| 1.69 | 1.79 | 1.73 |
| 2.22 | 2.27 | 2.27 |
| 2.25 | 2.49 | 2.44 |
| 2.49 | 2.50 | 2.45 |
| 2.15 | 2.08 | 2.18 |
| 2.56 | 2.13 | 2.44 |
| 2.38 | 2.41 | 2.43 |
| 2.87 | 2.69 | 2.83 |
| 2.89 | 2.45 | 2.64 |
| 2.57 | 2.74 | 2.60 |
| 2.50 | 2.35 | 2.46 |
| 2.87 | 2.71 | 2.87 |
| 2.86 | 2.72 | 2.73 |
| 2.42 | 2.70 | 2.53 |
| 2.84 | 2.92 | 3.23 |

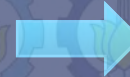
Tebal Lapisan Recast



Mikroskop Olympus
BX41-32PO2



Perbesaran 500x

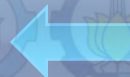


Tabel Tebal Lapisan Recast (μs)

| Replikasi 1 | Replikasi 2 | Replikasi 3 |
|-------------|-------------|-------------|
| 1.85 | 1.40 | 1.49 |
| 1.45 | 0.87 | 1.31 |
| 3.10 | 2.82 | 2.71 |
| 2.44 | 3.06 | 2.95 |
| 3.06 | 3.60 | 3.81 |
| 4.69 | 4.24 | 3.97 |
| 4.04 | 3.09 | 3.97 |
| 3.27 | 2.43 | 2.55 |
| 4.06 | 4.40 | 3.76 |
| 5.12 | 4.80 | 5.69 |
| 2.24 | 3.56 | 3.00 |
| 3.14 | 3.30 | 3.18 |
| 13.28 | 12.75 | 13.88 |
| 12.77 | 13.11 | 14.18 |
| 8.69 | 8.92 | 9.70 |
| 3.85 | 5.34 | 5.05 |
| 5.92 | 7.89 | 8.96 |
| 9.65 | 9.55 | 10.29 |
| 2.81 | 2.64 | 2.63 |
| 0.57 | 0.54 | 0.00 |
| 2.28 | 1.14 | 1.04 |
| 8.06 | 6.65 | 6.56 |
| 7.24 | 7.11 | 7.68 |
| 11.27 | 9.89 | 10.60 |
| 7.30 | 8.03 | 7.67 |
| 8.04 | 9.41 | 8.76 |
| 6.94 | 6.76 | 6.73 |



Mounting dan etsa



Tahap Analisis Data

Optimasi respon individu

Normalisasi

Optimasi Multirespon

Ekperimen konfirmasi



Optimasi respon individu

Hasil eksperimen masing-masing respon



Metode Taguchi



Rasio S/N respon individu

Laju pengerjaan bahan

Semakin besar semakin baik

Minitab R16

Semakin kecil semakin baik

Lebar Pemotongan
Kekasaran permukaan
Tebal lapisan *recast*

Normalisasi

Rasio S/N respon individu

| Eks. | Laju pengerjaan bahan | Lebar pemotongan | Kekasaran permukaan | Tebal lapisan recast |
|------|-----------------------|------------------|---------------------|----------------------|
| 1 | 24.74 | -50.80 | -4.12 | -4.06 |
| 2 | 23.15 | -50.40 | -5.09 | -1.85 |
| 3 | 22.19 | -50.34 | -6.27 | -9.20 |
| 4 | 24.11 | -50.54 | -6.68 | -9.03 |
| 5 | 23.57 | -50.71 | -6.65 | -10.90 |
| 6 | 24.91 | -50.60 | -7.00 | -12.69 |
| 7 | 24.31 | -50.66 | -5.95 | -11.43 |
| 8 | 24.56 | -50.77 | -5.85 | -8.86 |
| 9 | 23.65 | -50.74 | -7.03 | -12.21 |
| 10 | 26.61 | -50.99 | -7.62 | -14.35 |
| 11 | 25.95 | -51.05 | -6.51 | -9.50 |
| 12 | 26.62 | -50.88 | -6.98 | -10.12 |
| 13 | 26.70 | -50.83 | -4.79 | -22.49 |
| 14 | 27.59 | -50.94 | -7.05 | -22.52 |
| 15 | 26.53 | -51.13 | -7.57 | -19.19 |
| 16 | 26.89 | -50.83 | -7.89 | -13.60 |
| 17 | 26.87 | -51.07 | -6.59 | -17.72 |
| 18 | 26.37 | -50.99 | -7.54 | -19.86 |
| 19 | 29.00 | -51.31 | -7.63 | -8.61 |
| 20 | 29.22 | -51.34 | -8.93 | 6.92 |
| 21 | 29.26 | -51.31 | -8.51 | -4.03 |
| 22 | 26.77 | -51.13 | -8.41 | -17.06 |
| 23 | 28.47 | -50.94 | -7.74 | -17.32 |
| 24 | 27.98 | -51.13 | -8.99 | -20.51 |
| 25 | 29.03 | -51.13 | -8.85 | -17.70 |
| 26 | 28.82 | -51.07 | -8.13 | -18.85 |
| 27 | 28.76 | -51.07 | -9.55 | -16.66 |

$$x_i(k) = \frac{\eta_i(k) - \min(\eta_i(k))}{\max(\eta_i(k)) - \min(\eta_i(k))}$$

$$\gamma(x_o(k), x_i(k)) = \frac{\Delta_{\min} + \xi \cdot \Delta_{\max}}{\Delta_{oi}(k) + \xi \cdot \Delta_{\max}}$$

Normalisasi

Pada proses ini, nilai rasio S/N dinormalkan dalam nilai yang besarnya antara 0 dan 1

Koefisien grey-relational

| Eks. | Laju pengerjaan bahan | Lebar pemotongan | Kekasaran permukaan | Tebal lapisan recast |
|------|-----------------------|------------------|---------------------|----------------------|
| 1 | 0.4390 | 0.5215 | 1.0000 | 0.5728 |
| 2 | 0.3664 | 0.8940 | 0.7382 | 0.6266 |
| 3 | 0.3333 | 1.0000 | 0.5584 | 0.4773 |
| 4 | 0.4068 | 0.7104 | 0.5153 | 0.4799 |
| 5 | 0.3832 | 0.5716 | 0.5175 | 0.4524 |
| 6 | 0.4485 | 0.6566 | 0.4855 | 0.4288 |
| 7 | 0.4166 | 0.6103 | 0.5978 | 0.4452 |
| 8 | 0.4291 | 0.5369 | 0.6107 | 0.4826 |
| 9 | 0.3867 | 0.5536 | 0.4832 | 0.4348 |
| 10 | 0.5716 | 0.4338 | 0.4371 | 0.4090 |
| 11 | 0.5164 | 0.4144 | 0.5323 | 0.4727 |
| 12 | 0.5720 | 0.4797 | 0.4876 | 0.4635 |
| 13 | 0.5800 | 0.5068 | 0.8033 | 0.3336 |
| 14 | 0.6795 | 0.4556 | 0.4811 | 0.3333 |
| 15 | 0.5644 | 0.3883 | 0.4403 | 0.3605 |
| 16 | 0.5984 | 0.5067 | 0.4186 | 0.4177 |
| 17 | 0.5969 | 0.4053 | 0.5236 | 0.3740 |
| 18 | 0.5504 | 0.4338 | 0.4424 | 0.3547 |
| 19 | 0.9314 | 0.3393 | 0.4364 | 0.4866 |
| 20 | 0.9873 | 0.3333 | 0.3607 | 1.0000 |
| 21 | 1.0000 | 0.3392 | 0.3822 | 0.5734 |
| 22 | 0.5869 | 0.3884 | 0.3878 | 0.3804 |
| 23 | 0.8172 | 0.4557 | 0.4286 | 0.3778 |
| 24 | 0.7336 | 0.3883 | 0.3583 | 0.3493 |
| 25 | 0.9393 | 0.3884 | 0.3648 | 0.3742 |
| 26 | 0.8880 | 0.4048 | 0.4039 | 0.3636 |
| 27 | 0.8753 | 0.4053 | 0.3333 | 0.3843 |

Optimasi multirespon

Koefisien *grey-relational*

Logika *fuzzy*

Grey-fuzzy reasoning grade

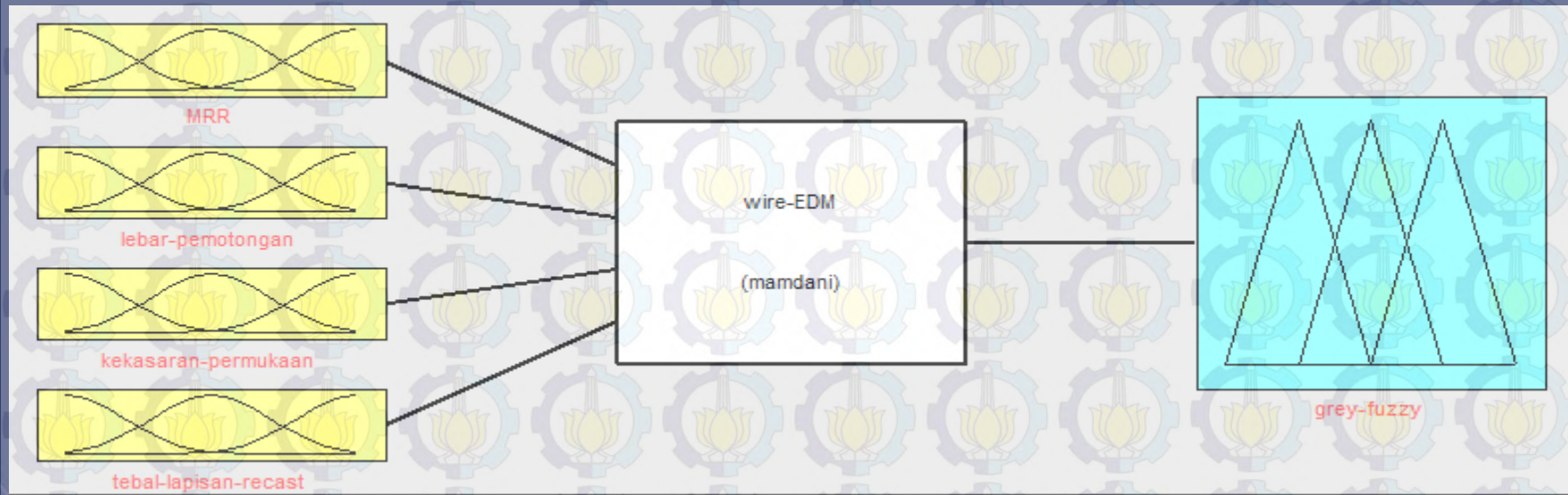
| Eks. | Laju pengerjaan bahan | Lebar pemotongan | Kekasaran permukaan | Tebal lapisan <i>recast</i> |
|------|-----------------------|------------------|---------------------|-----------------------------|
| 1 | 0.4390 | 0.5215 | 1.0000 | 0.5728 |
| 2 | 0.3664 | 0.8940 | 0.7382 | 0.6266 |
| 3 | 0.3333 | 1.0000 | 0.5584 | 0.4773 |
| 4 | 0.4068 | 0.7104 | 0.5153 | 0.4799 |
| 5 | 0.3832 | 0.5716 | 0.5175 | 0.4524 |
| 6 | 0.4485 | 0.6566 | 0.4855 | 0.4288 |
| 7 | 0.4166 | 0.6103 | 0.5978 | 0.4452 |
| 8 | 0.4291 | 0.5369 | 0.6107 | 0.4826 |
| 9 | 0.3867 | 0.5536 | 0.4832 | 0.4348 |
| 10 | 0.5716 | 0.4338 | 0.4371 | 0.4090 |
| 11 | 0.5164 | 0.4144 | 0.5323 | 0.4727 |
| 12 | 0.5720 | 0.4797 | 0.4876 | 0.4635 |
| 13 | 0.5800 | 0.5068 | 0.8033 | 0.3336 |
| 14 | 0.6795 | 0.4556 | 0.4811 | 0.3333 |
| 15 | 0.5644 | 0.3883 | 0.4403 | 0.3605 |
| 16 | 0.5984 | 0.5067 | 0.4186 | 0.4177 |
| 17 | 0.5969 | 0.4053 | 0.5236 | 0.3740 |
| 18 | 0.5504 | 0.4338 | 0.4424 | 0.3547 |
| 19 | 0.9314 | 0.3393 | 0.4364 | 0.4866 |
| 20 | 0.9873 | 0.3333 | 0.3607 | 1.0000 |
| 21 | 1.0000 | 0.3392 | 0.3822 | 0.5734 |
| 22 | 0.5869 | 0.3884 | 0.3878 | 0.3804 |
| 23 | 0.8172 | 0.4557 | 0.4286 | 0.3778 |
| 24 | 0.7336 | 0.3883 | 0.3583 | 0.3493 |
| 25 | 0.9393 | 0.3884 | 0.3648 | 0.3742 |
| 26 | 0.8880 | 0.4048 | 0.4039 | 0.3636 |
| 27 | 0.8753 | 0.4053 | 0.3333 | 0.3843 |

Mathlab

Nilai *grey-fuzzy reasoning grade* hasil defuzzifikasi ini dianalisis sebagai variabel respon baru yang mewakili variabel laju pengerjaan bahan, lebar pemotongan, kekasaran permukaan dan tebal lapisan *recast*

| Eks. | Grey-fuzzy reasoning grade |
|------|----------------------------|
| 1 | 0.6380 |
| 2 | 0.6458 |
| 3 | 0.5903 |
| 4 | 0.5213 |
| 5 | 0.4773 |
| 6 | 0.4888 |
| 7 | 0.5207 |
| 8 | 0.5173 |
| 9 | 0.4488 |
| 10 | 0.4351 |
| 11 | 0.4807 |
| 12 | 0.4912 |
| 13 | 0.5512 |
| 14 | 0.4765 |
| 15 | 0.4150 |
| 16 | 0.4734 |
| 17 | 0.4681 |
| 18 | 0.4224 |
| 19 | 0.5156 |
| 20 | 0.6526 |
| 21 | 0.5639 |
| 22 | 0.4046 |
| 23 | 0.4825 |
| 24 | 0.4246 |
| 25 | 0.4676 |
| 26 | 0.4589 |
| 27 | 0.4498 |

Unit Logika *Fuzzy*



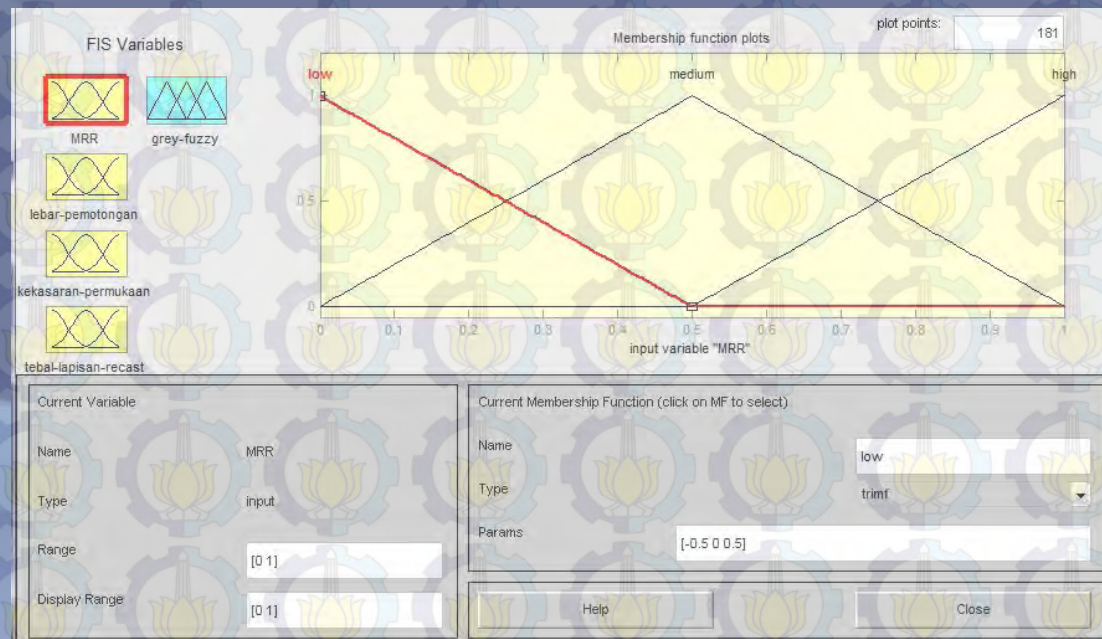
Koefisien *grey-relational*

Grey-fuzzy reasoning
grade



Unit Logika *Fuzzy*

Koefisien *grey-relational* → *linguistic fuzzy subsets* → 3 fungsi keanggotaan dengan bentuk segitiga (*Triangle*)



Fungsi keanggotaan variabel input

Unit Logika *Fuzzy*

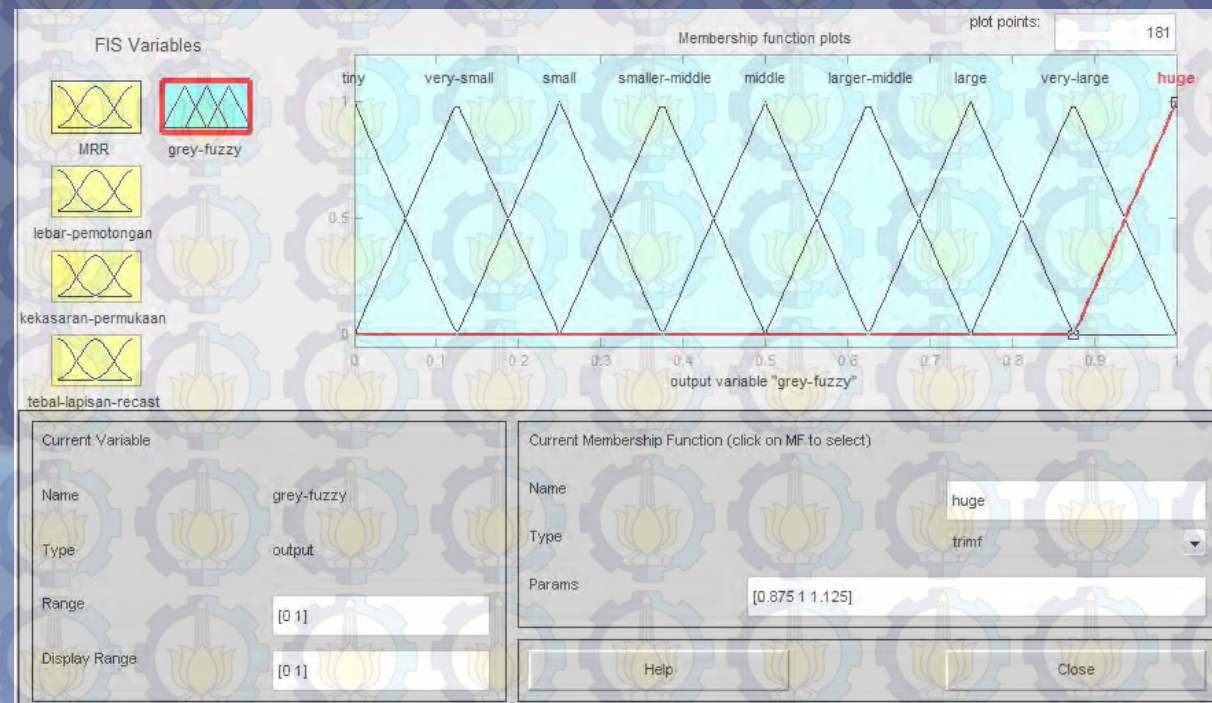
*Grey-fuzzy
reasoning grade*



linguistic fuzzy subsets



9 fungsi keanggotaan
dengan bentuk segitiga
(*Triangle*)



Fungsi keanggotaan variabel output



Unit Logika *Fuzzy*

1. If (MRR is low) and (lebar-pemotongan is low) and (kekasaran-permukaan is low) and (tebal-lapisan-recast is low) then (grey-fuzzy is tiny) (1)
2. If (MRR is low) and (lebar-pemotongan is low) and (kekasaran-permukaan is low) and (tebal-lapisan-recast is medium) then (grey-fuzzy is very-small) (1)
3. If (MRR is low) and (lebar-pemotongan is low) and (kekasaran-permukaan is low) and (tebal-lapisan-recast is high) then (grey-fuzzy is small) (1)
4. If (MRR is low) and (lebar-pemotongan is low) and (kekasaran-permukaan is medium) and (tebal-lapisan-recast is low) then (grey-fuzzy is very-small) (1)
5. If (MRR is low) and (lebar-pemotongan is low) and (kekasaran-permukaan is medium) and (tebal-lapisan-recast is medium) then (grey-fuzzy is small) (1)
6. If (MRR is low) and (lebar-pemotongan is low) and (kekasaran-permukaan is high) and (tebal-lapisan-recast is medium) then (grey-fuzzy is smaller-middle) (1)
7. If (MRR is low) and (lebar-pemotongan is low) and (kekasaran-permukaan is high) and (tebal-lapisan-recast is low) then (grey-fuzzy is small) (1)
8. If (MRR is low) and (lebar-pemotongan is low) and (kekasaran-permukaan is high) and (tebal-lapisan-recast is medium) then (grey-fuzzy is smaller-middle) (1)
9. If (MRR is low) and (lebar-pemotongan is low) and (kekasaran-permukaan is high) and (tebal-lapisan-recast is high) then (grey-fuzzy is middle) (1)
10. If (MRR is low) and (lebar-pemotongan is medium) and (kekasaran-permukaan is low) and (tebal-lapisan-recast is low) then (grey-fuzzy is very-small) (1)

If MRR is and lebar-pemotongan is and kekasaran-permukaan is and tebal-lapisan-recast is Then grey-fuzzy is

☐ not ☐ not ☐ not ☐ not ☐ not

Connection: ☐ or ☒ and Weight:

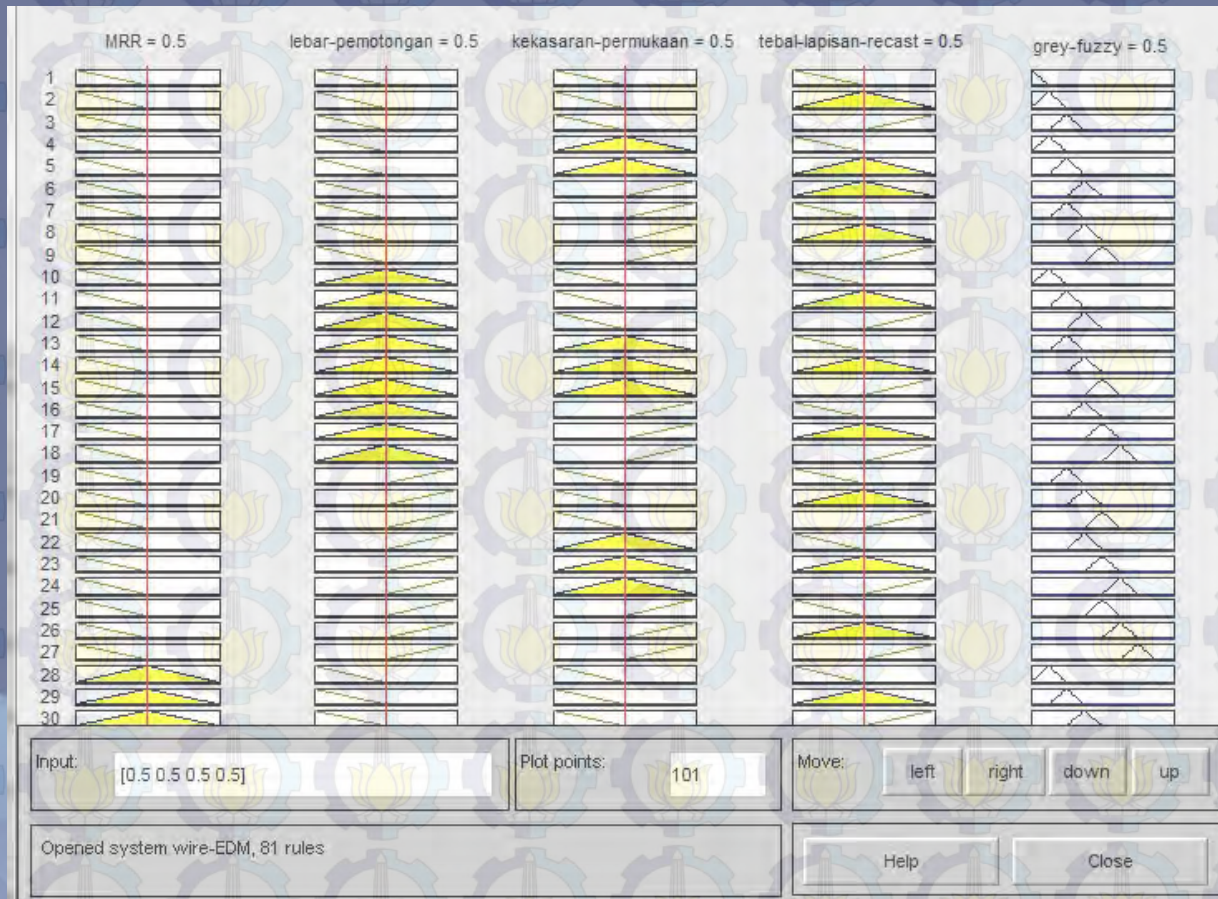
Delete rule Add rule Change rule

FIS Name: wire-EDM Help Close

Aturan dasar *fuzzy*



Unit Logika *Fuzzy*



Sistem inferensi *fuzzy mamdani*
Metode defuzzifikasi centroid



Optimasi multirespon

Grey-fuzzy reasoning grade

Taguchi

Rasio S/N grey-fuzzy reasoning grade

| Eks. | Grey-fuzzy reasoning grade | Rasio S/N Grey-fuzzy reasoning grade |
|------|----------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 0.6380 | -3.90359 |
| 2 | 0.6458 | -3.79804 |
| 3 | 0.5903 | -4.57854 |
| 4 | 0.5213 | -5.65825 |
| 5 | 0.4773 | -6.42417 |
| 6 | 0.4888 | -6.21738 |
| 7 | 0.5207 | -5.66825 |
| 8 | 0.5173 | -5.72515 |
| 9 | 0.4488 | -6.95894 |
| 10 | 0.4351 | -7.22822 |
| 11 | 0.4807 | -6.36252 |
| 12 | 0.4912 | -6.17483 |
| 13 | 0.5512 | -5.17382 |
| 14 | 0.4765 | -6.43874 |
| 15 | 0.4150 | -7.63904 |
| 16 | 0.4734 | -6.49543 |
| 17 | 0.4681 | -6.59323 |
| 18 | 0.4224 | -7.48552 |
| 19 | 0.5156 | -5.75374 |
| 20 | 0.6526 | -3.70706 |
| 21 | 0.5639 | -4.97596 |
| 22 | 0.4046 | -7.85948 |
| 23 | 0.4825 | -6.33005 |
| 24 | 0.4246 | -7.44040 |
| 25 | 0.4676 | -6.60251 |
| 26 | 0.4589 | -6.76564 |
| 27 | 0.4498 | -6.93961 |



Optimasi multirespon

Analisis variansi multirespon

| Sumber variasi | db | SS | MS | F _{hitung} |
|----------------|----|---------|--------|---------------------|
| ON | 2 | 6.6426 | 3.3213 | 5.3239 |
| OV | 2 | 11.9952 | 5.9976 | 9.6138 |
| ON X OV(1) | 2 | 2.2664 | 1.1332 | 1.8165 |
| ON X OV(2) | 2 | 3.9312 | 1.9656 | 3.1508 |
| OFF | 2 | 2.2456 | 1.1228 | 1.7998 |
| ON X OFF(1) | 2 | 1.0012 | 0.5006 | 0.8024 |
| ON X OFF(2) | 2 | 1.0541 | 0.5271 | 0.8448 |
| OV X OFF(1) | 2 | 0.8855 | 0.4428 | 0.7097 |
| SV | 2 | 0.3783 | 0.1892 | 0.3032 |
| WF | 2 | 0.8729 | 0.4365 | 0.6996 |
| OV X OFF(2) | 2 | 1.0489 | 0.5245 | 0.8407 |
| WL | 2 | 0.7090 | 0.3545 | 0.5682 |
| Error | 2 | 1.2477 | 0.6239 | |
| Total | 26 | 34.2787 | | |

Analisis variansi multirespon penggabungan (*pooled*)

| Sumber variasi | db | SS | MS | F _{hitung} | Ket |
|----------------|----|---------|---------------|---------------------|-----|
| ON | 2 | 6.6426 | 3.3213 | 9.4976 | >2 |
| OV | 2 | 11.9952 | 5.9976 | 17.1507 | >2 |
| ON X OV(1) | 2 | 2.2664 | 1.1332 | 3.2405 | >2 |
| ON X OV(2) | 2 | 3.9312 | 1.9656 | 5.6208 | >2 |
| OFF | 2 | 2.2456 | 1.1228 | 3.2108 | >2 |
| ON X OFF(1) | 2 | | <i>pooled</i> | | |
| ON X OFF(2) | 2 | 1.0541 | 0.5271 | 1.5071 | <2 |
| OV X OFF(1) | 2 | | <i>pooled</i> | | |
| SV | 2 | | <i>pooled</i> | | |
| WF | 2 | | <i>pooled</i> | | |
| OV X OFF(2) | 2 | | <i>pooled</i> | | |
| WL | 2 | | <i>pooled</i> | | |
| Error | 14 | 4.8958 | 0.3497 | | |
| Total | 26 | 34.2787 | | | |

Untuk mengetahui faktor/interaksi yang signifikan terhadap rata-rata multirespon yang optimal, maka dilakukan penggabungan (*pooling up*) beberapa faktor ke dalam error.



Optimasi multirespon

Analisis variansi multirespon hasil penggabungan

| Sumber variasi | db | SS | MS | F _{hitung} | p |
|----------------|----|---------|--------|---------------------|-------|
| ON | 2 | 6.6426 | 3.3213 | 9.4976 | 17.34 |
| OV | 2 | 11.9952 | 5.9976 | 17.1507 | 32.95 |
| ON X OV | 4 | 6.1976 | 1.5494 | 4.4307 | 14.00 |
| OFF | 2 | 2.2456 | 1.1228 | 3.2108 | 4.51 |
| ON X OFF(2) | 2 | 1.0541 | 0.5271 | 1.5071 | 1.03 |
| Error | 14 | 4.8958 | 0.3497 | | 30.16 |
| Total | 26 | 34.2787 | | | 100 |

Kondisi hipotesis nol multirespon

| Sumber variasi | Kondisi H ₀ |
|----------------|------------------------|
| ON | ditolak |
| OV | ditolak |
| ON X OV(1) | ditolak |
| ON X OV(2) | ditolak |
| OFF | ditolak |
| ON X OFF(2) | gagal ditolak |

Kombinasi optimum pada faktor yang signifikan

| Faktor | ON | OV | ONxOV(1) | ONxOV(2) | OFF |
|---------------|---------|---------|----------|----------|---------|
| Level optimum | Level 1 | Level 1 | Level 3 | Level 1 | Level 2 |



Eksperimen konfirmasi

Kombinasi faktor pada eksperimen konfirmasi

| Seting faktor | Kombinasi awal | Kombinasi optimum |
|---------------|----------------|-------------------|
| ON | Level 2 | Level 1 |
| OV | Level 2 | Level 1 |
| OFF | Level 2 | Level 2 |
| SV | Level 2 | Level 1 |
| WF | Level 2 | Level 1 |
| WL | Level 2 | Level 1 |

Eksperimen konfirmasi dilakukan untuk memvalidasi hasil optimasi yang diperoleh

Hasil eksperimen konfirmasi

| Seting faktor | Laju pengerjaan bahan (m ³ /min) | Lebar pemotongan (μm) | Kekasaran permukaan (μm) | Tebal lapisan <i>recast</i> (μm) |
|-------------------|---|-----------------------|--------------------------|----------------------------------|
| Kombinasi awal | 17.93 | 353 | 2.05 | 9.12 |
| | 18.06 | 360 | 2.56 | 8.72 |
| | 17.76 | 353 | 2.39 | 8.64 |
| | 17.98 | 350 | 2.43 | 9.35 |
| | 16.93 | 357 | 2.53 | 9.27 |
| | 17.73 | 354.67 | 2.39 | 9.02 |
| Kombinasi optimum | 16.76 | 340 | 2.19 | 1.97 |
| | 16.60 | 340 | 1.76 | 2.74 |
| | 16.57 | 340 | 1.89 | 2.55 |
| | 16.24 | 337 | 1.92 | 3.01 |
| | 16.22 | 330 | 1.87 | 2.97 |
| | 16.48 | 337.33 | 1.93 | 2.65 |



Eksperimen konfirmasi

Nilai rasio S/N masing-masing respon pada eksperimen konfirmasi

| Seting faktor | Laju pengerjaan bahan | Lebar pemotongan | Kekasaran permukaan | Tebal lapisan recast |
|-------------------|-----------------------|------------------|---------------------|----------------------|
| Kombinasi awal | 24.97 | -51.00 | -7.60 | -19.11 |
| Kombinasi optimum | 24.34 | -50.56 | -5.72 | -8.54 |

Koefisien *grey-relational* respon pada eksperimen konfirmasi

| Seting faktor | Laju pengerjaan bahan | Lebar pemotongan | Kekasaran permukaan | Tebal lapisan recast |
|-------------------|-----------------------|------------------|---------------------|----------------------|
| Kombinasi awal | 0.4515 | 0.4319 | 0.4384 | 0.3612 |
| Kombinasi optimum | 0.4178 | 0.6931 | 0.6301 | 0.4877 |

Nilai *grey-fuzzy reasoning grade* dan rasio S/N eksperimen konfirmasi

| Seting faktor | <i>grey-fuzzy reasoning grade</i> | rasio S/N |
|-------------------|-----------------------------------|-----------|
| Kombinasi awal | 0.4008 | -7.9414 |
| Kombinasi optimum | 0.6878 | -4.5653 |
| Peningkatan | 71.61% | 42.51% |

Rasio S/N multirespon mengalami peningkatan yang signifikan, yaitu sebesar 42.51%

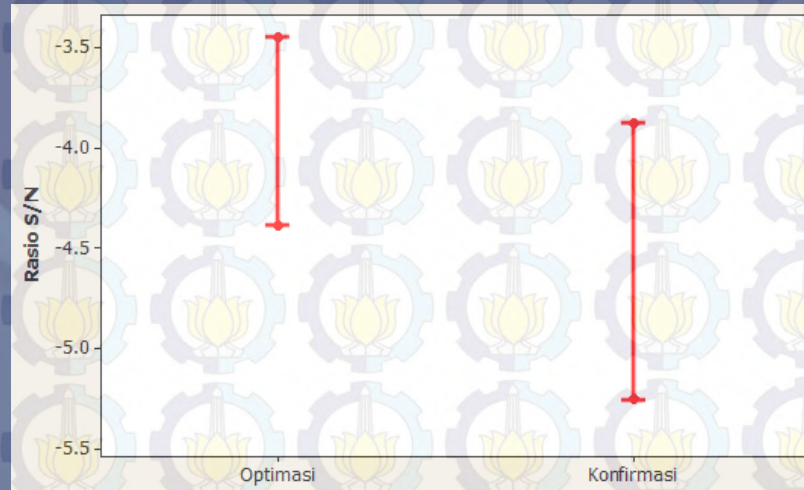
Interval kepercayaan rata-rata rasio S/N

Optimasi

3.9194 ± 0.5118 atau
 $-4.4312 \leq \mu_{\text{prediksi}} \leq -3.4076$.

Eksperimen konfirmasi

-4.5653 ± 0.8601 atau
 $-5.4252 \leq S/N_{\text{konfirmasi}} \leq -3.7053$.



Plot interval keyakinan hasil optimasi dan eksperimen konfirmasi

Kedua interval kepercayaan tersebut mempunyai daerah yang beririsan, sehingga dapat disimpulkan bahwa tidak ada perbedaan antara rasio S/N hasil optimasi dengan rasio S/N hasil eksperimen konfirmasi.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil eksperimen dan analisisnya serta hasil eksperimen konfirmasi yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1a. Kontribusi dari faktor-faktor yang signifikan dalam meminimumkan lebar pemotongan, kekasaran permukaan, tebal lapisan *recast*, dan memaksimalkan laju pengerjaan bahan (*material removal rate*) adalah sebagai berikut:

- Faktor *on time* sebesar 17.34%.
- Faktor *open voltage* sebesar 32.95%.
- Faktor *off time* sebesar 4.51%.
- Interaksi faktor *on time* dengan faktor *open voltage* sebesar 14.00%.

1b. Kontribusi *error* masih sebesar 30%, sehingga masih ada faktor-faktor atau variabel-variabel penting lain yang belum sertakan dalam penelitian.

2. Seting kombinasi optimum dari faktor-faktor yang signifikan dalam meminimumkan lebar pemotongan, kekasaran permukaan, tebal lapisan *recast*, dan memaksimalkan laju pengerjaan bahan adalah sebagai berikut:

- *On time* pada 0.4 μ s.
- *Open voltage* pada 75 volt
- *Off time* sebesar pada 11 μ s.

Saran

Adapun saran yang dapat diberikan setelah melakukan penelitian adalah sebagai berikut:

- a. Karena kontribusi *error* masih sebesar 30%, maka pada penelitian selanjutnya ditambahkan faktor-faktor penting yang lain untuk mengurangi besarnya *error*.
- b. Metode optimasi multirespon dalam penelitian ini menggunakan logika *fuzzy*. Pada penelitian selanjutnya, dapat dilakukan sebuah studi untuk melakukan optimasi multirespon dengan menggunakan metode-metode optimasi yang lain sebagai perbandingan.

Terima kasih



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember